

ラジオダクト及び見通し内 VHF 帯伝搬異常と地震との統計的関連性

大曾根 暖¹, 小川 潤也¹, 羽賀 望¹, 本島 邦行¹

¹群馬大学大学院 工学研究科 電気電子工学専攻

Statistical relation between earthquakes and anomalous line-of-sight propagation in the VHF band and radio ducts.

Dan Osone, Jun-ya Ogawa, Nozomi Haga, Kuniyuki Motojima

Dept.Electronic Eng.,Gunma University,1-5-1 Tenjin-cho,Kiryu 376-8515,Gunma,Japan

Abstract. In our previous paper, statistical relation between anomalous line-of-sight propagation in the VHF band and occurrences of earthquakes was presented. Basically, the anomalous propagation is mainly caused by anomalous refractive index of low atmosphere. In the present paper, the anomalies of the refractive index is captured by both the direct observation of radio ducts and the anomalous propagation in the VHF band, and the relation between them and the earthquakes are statistically clarified. Furthermore, the influences of meteorological conditions, which may disperse the anomalies of refractive index in the low atmosphere, are discussed. As a result, relation between anomalous propagation and earthquakes became increasingly clear by using anomalous propagation that concurrent with S-type ducts and meteorological conditions, wind velocity.

Key words: short-term earthquake prediction, anomalous refractive index of the low atmosphere, VHF band, line-of-sight propagation, radio ducts, meteorological conditions.

1. はじめに

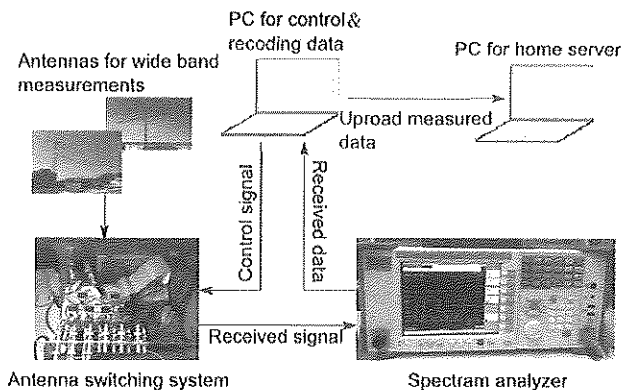
昨年の東日本大震災発生以来、地震予知を目的とした研究に世間の注目が高まっている。その中でも、地震回避行動が可能である短期地震予知は地震大国日本にとって重要である。短期地震予知を目的として、地球規模で生じる電磁気学的現象と地震発生の関連性について、様々な観測結果が報告されている(早川, 2006)。地震の前兆現象として現れる電磁気学的現象の報告として、主に ULF 帯、VLF 帯、VHF 帯の 3 つの周波数帯における電波伝搬の観測結果が報告されている。例えば、VLF 帯における観測では、電離層・大地導波管モードで伝搬する既存送信局からの電波を計測することで、電離層下部に生じた擾乱を間接的に捉えた報告である(Hayakawa *et al.*, 1996; Molchanov and Hayakawa, 1998)。この観測方法では、送信局と受信局(観測点)間を結ぶ大円近傍の異常現象を捉えることができるため、観測可能領域が数千 km と広範囲である。一方、VHF

帯を用いた観測では、伝搬異常による見通し外 VHF 帯放送波を捉えることで、電磁気学的現象を観測する方法である(串田, 2000; *Kushida and Kushida*, 2002; *Yonaiguchi et al.*, 2007)。さらに、単に伝搬異常を捉えるだけでなく、受信波の到来方向や偏波を計測することで、地震との関連性をより深く追求した報告もなされている(米内口ほか, 2007)。これらの研究結果から、見通し外の VHF 帯伝搬異常は電離層内ではなく地表面に近い大気圏内の異常を捉えたものであることが明らかとなっている(*Fukumoto et al.*, 2001; *Fujiwara et al.*, 2004)。また見通し内 VHF 帯放送波を用いて受信電界強度の変動を統計処理することで伝搬異常を検出し、地震発生との関連性について検証した報告もある(本島ほか, 2009; *Motojima*, 2009; 本島, 2011)。見通し内の近距離電波伝搬特性および受信レベル変動要因については、VHF 帯からミリ波帯まで、通信、放送の両面からこれまで多くの研究がされてきた。ところで通常の大気は、高度が高くなるほど希薄となり屈折率が減少するため、見通し内伝搬波は地表面側に緩く屈折しながら低層大気中を伝搬する。しかし、この低層大気中の屈折率に異常が生じた場合には、通常的地表面側への屈折が生じず、見通し内であるはずの受信点まで電波が到達しない(あるいは微弱となる)伝搬異常を生じる。また、これとは逆の現象により、受信点における電界強度が通常より大きくなる場合もある。このように、大気屈折率の空間的・時間的変化による電波伝搬変化の研究報告もある(*Hall*, 1996; 吉田ほか, 2010; 西ほか, 2011)。

本論文では低層大気屈折率異常をラジオダクトの直接観測と見通し内 VHF 帯電波伝搬異常の両面から捉え、それらと地震との関連性を統計的に明らかにする。また、低層大気屈折率異常を消失させる要因として考えられる気象条件について考察した。

2. 観測システムとデータ解析方法

筆者らは電波伝搬自動観測システムを構築し、見通し内 VHF 帯放送波の受信電界強度を約 2 年に渡って連続観測を行った(現在も観測を継続中)。この観測システムは Fig.1 に示すように群馬大学工学部桐生キャンパス(群馬県桐生市)に設置された複数のアンテナと、観測周波数に応じて最適なアンテナを選択する自動アンテナ切替機、受信電界強度計測用の汎用スペクトラムアナライザ、データ記録及び制御用 PC で構成されており、24 時間連続で自動観測が可能である。また、スペクトラムアナライザを用いることで、正確な電界強度を計測することが可能である。受信電界強度は約 30 秒毎ごとに各観測波を巡回計測しており、計測された受信電界強度は 30 分毎に自動でグラフ化されてから大学のホームページサーバにアップロードされ、インターネット上のどこから



でも受信電界強度変化を監視できるようになっている。

Fig. 1 Observation system for line-of-sight propagation in the VHF band.

本論文では、東京タワーを送

信局とする VHF 帯 FM 放送波（周波数は 80.0MHz）の観測結果を統計的に解析して、伝搬異常を検出した。観測期間を 2010 年 10 月 8 日から 2012 年 6 月 3 日までの 585 日間（2011 年 3 月 12 日から 2011 年 3 月 30 日までは計画停電により観測システムが止まっていたため観測期間から除く）として、この間に観測された受信電界強度を解析対象とした。伝搬異常の判断は統計学で用いられる標準偏差 σ を求めて平均値 m より $\pm 3\sigma$ 以上外れた受信データを異常データとし、その状態が 1 時間以上継続した場合を伝搬異常と判断することにした。伝搬異常を求めるにあたり、受信電界強度にはノイズや短時間揺らぎを含むため、10 分間の移動平均を受信データとする。また、受信電界強度には日変化が生じるため、1 日を 5 分ごとの 288 の時間帯に分けて、各々の時間帯別に過去の受信電界強度の平均値 m と標準偏差 σ を算出することで日変化の影響を取り除いた。また観測対象の放送局のいくつかは設備の保守点検のため週に 1 度の頻度で停波するが、停波中であることは容易に見分けが付くので除外している。

3. ラジオダクトと伝搬異常との関連性

前述の条件で判定した伝搬異常は観測期間中 31 回観測されており、これは平均すると 19 日に 1 回の頻度で伝搬異常が観測されたことになる。確率にすると 1 日あたり 5.3% の確率で伝搬異常が観測されることになる。伝搬異常が発生する直接の要因は低層大気屈折率異常によるものと考えられるため、低層大気屈折率異常をラジオダクトの直接観測によって捉え、それと伝搬異常との関連性を考察する。ラジオダクトの有無は大気の修正屈折指数から判断される。

ここでは、修正屈折指数の求め方について記述する。大気屈折率 n の値は通常 1.0003 程度で、その変化は 10^{-5} から 10^{-6} のオーダーであり非常に小さい値であるので、その変化を明瞭にするため、以下に定義する屈折指数 M [NU] が一般に広く用いられている（進士昌明, 1992）。

$$N \equiv (n - 1) \times 10^6 \quad (1)$$

屈折指数 N は気温・気圧・湿度の関数であり、次式で与えられる。

$$N = \frac{77.6}{T} \left(P + \frac{4610P_w}{T} \right) \quad (2)$$

ここで、 T は気温 [K]、 P は大気圧 [hPa]、 P_w は水蒸気圧 [hPa] である。

さらに、屈折率垂直構造の複雑な大気中伝搬の解析には、大気が平面大地上に水平に成層していると取り扱えるよう、以下に示す修正屈折率 m 、修正屈折指数 M [MU] が多く用いられている。

$$m \equiv n + h/a \quad (3)$$

$$M \equiv (m - 1) \times 10^6 = N + 157h \quad (4)$$

ここで、 h は海拔高度 [km]、 a は地球の半径で 6,370 km である。関東には茨城県つくば市館野に高層気象台があるため、高層気象台が毎日 9 時と 21 時に定時観測している気象データ（気圧、ジオポテンシャル高度、風速など）を用いて修正屈折指数 M を求める。

ラジオダクトには Fig.2 に示すようにラジオダクトの形状が異なるものが存在する。本論文では、逆転層が地面と接しているラジオダクトを接地型ダクト (Grounded duct)、逆転層が上空にあるラジオダクトを S 型ダクト (S-type duct) と定義する。ラジオダクトと見なす判断基準は、海拔高度の増加に対して修正屈折指数 M が少しでも減少している場合をラジオダクト発生とする。また、同時刻に接地型ダクトと S 型ダクトの両方が発生している場合がある（観測期間中 42 日）。この場合は、Fig.3 に示すように高度の増加に対して修正屈折指数 M が減少し始める点から再び正方向に増加し始める点までの高度差 (ΔA) と、その間の修正屈折指数 M の減少分 (ΔM) との積（すなわち点線で囲った部分の面積）が大きい方をその時間のラジオダクトとする（Fig.3 の場合は S 型ダクトとなる）。

ここで、ラジオダクトとの関連性を検討するために、ラジオダクトと伝搬異常が併発している時と併発していない時とに場合分けを行う。ラジオダクトは9時、または、21時の二度の定時観測においてラジオダクトが連続して発生している場合が多いので、Fig.4 に示すようにラジオダクトの発生時刻前後6時間以内に伝搬異常が発生していたら併発と見なす。

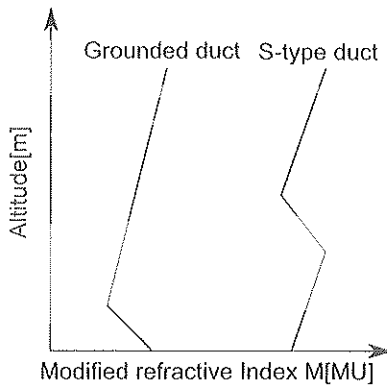


Fig. 2 Two types of ducts.

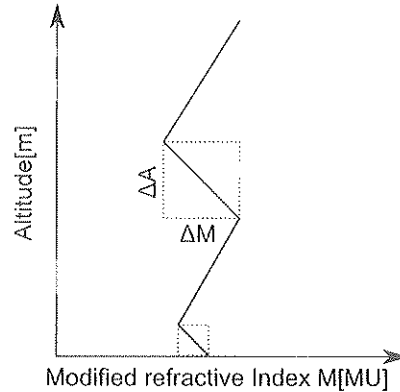


Fig. 3 Conceptual image of ducts.

上記の基準で判断した場合のラジオダクト発生の有無と、そのタイプ別、及び、観測された伝搬異常の有無を Table 1 に示す。Table 1 より伝搬異常発生の有無別にラジオダクトの発生確率と、ラジオダクト発生時における種類別発生確率を求める。伝搬異常観測時に、ラジオダクトが併発した確率は約 58.1% (18/31)、併発していない確率は約 41.9% (13/31) である。さらに、伝搬異常と併発していた 58.1% (18 回) のラジオダクトのうち、それが S 型ダクトであった確率は約 94.4% (17/18)、接地型ダクトであった確率は約 5.6% (1/18) である。一方で、伝搬異常と併発していなかったラジオダクトの発生確率は約 74.7% (414/554) であったが、そのうち S 型ダクトである確率は約 58.7% (243/414)、接地型ダクトである確率は約 41.3% (171/414) である。以上のことから、伝搬異常観測時に、併発して発生するラジオダクトは S 型ダクトである確率が高いと言える。このことから、ラジオダクトの発生高度が接地型ダクトのように低い（およそ 100m 以下）場合には伝搬異常は観測されず、S 型ダクトのようにある程度の高度（約 300-600m）で低層大気屈折率異常が発生した場合にのみ伝搬異常が観測されると考えられる。

しかし、低層大気屈折率異常が生じることによって伝搬異常が観測されるとするならば、ラジオダクトと併発していない伝搬異常が観測されていることは矛盾する。考えられる原因として、低層大気屈折率異常の規模による違いがあげられる。東京タワー—桐生観測点間の電波伝搬路と高層気象台がある館野との距離は約 43km 離れており、Fig.5 に示すように低層大気屈折率異常の分布が伝搬路に届かない程の小規模な場合には、館野でラジオダクトが観測されても桐生では電波伝搬異常が観測されず、逆に、東京—桐生観測点間に発生した小規模ダクトにより伝搬異常が引き起こされても、そのラジオダクトが館野で観測されなかった可能性が考えられる。一方、低層大気屈折率異常の分布が伝搬路に届く程の大規模な場合には、伝搬異常観測時に併発してラジオダクトが観測されるのではないかと考えられる。

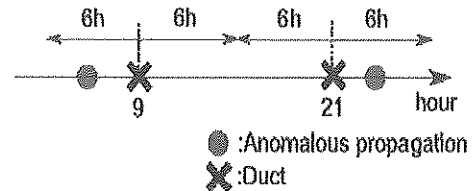


Fig. 4 Complication conditions of duct and anomalous propagation.

Table 1. Numbers of occurrence and non-occurrence of anomalous propagation and ducts.

	Anomalous propagation		Sum
	Occurrence	Nothing	
With S-type ducts	17	243	260
With grounded ducts	1	171	172
Without ducts	13	140	153
Sum	31	554	585

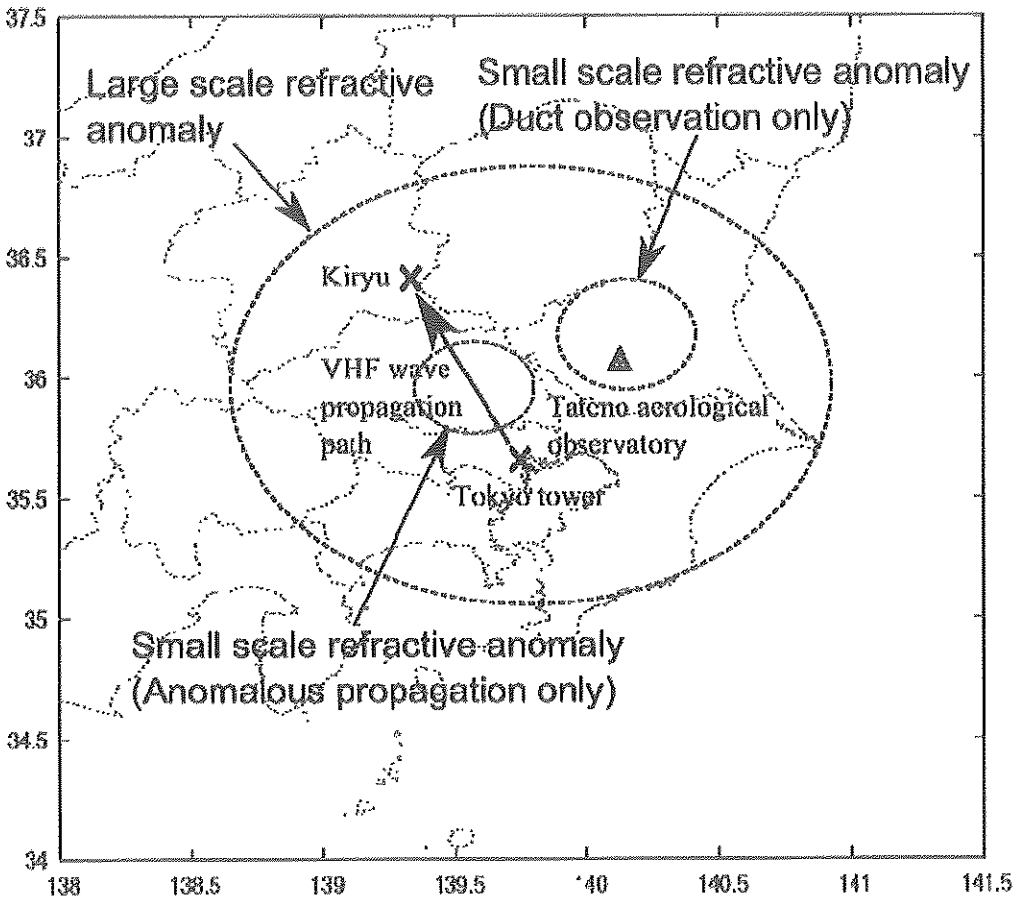


Fig.5 Distribution of refractive anomaly.

4. 伝搬異常と地震との関連性

次に、低層大気屈折率異常によって生じる伝搬異常と地震の発生時間間隔から、伝搬異常と地震の統計的関連性を検討する。まず、伝搬異常が観測されてから時刻間隔 t_{eq} 以内に地震が発生した場合、それらが併発したと見なし、全ての伝搬異常の観測回数 N_{anom} に対する地震と併発した伝搬異常の回数 n_{obs} の割合 P_{obs} を求める。

$$P_{\text{obs}} = \frac{n_{\text{obs}}}{N_{\text{anom}}} \quad (5)$$

これは、「実際に伝搬異常に地震が伴った確率」とも言い換えられる。次に、伝搬異常と地震が無関係であると仮定した場合において、地震と伝搬異常が偶然併発する確率 P_{unc} を求める。具体的には、観測時間長 T_{all} において地震が1度だけ発生したとすると、1回の伝搬異常の t_{eq} 以内にその地震が併発する確率は $t_{\text{eq}}/T_{\text{all}}$ で与えられるため、これに観測期間中の実際の地震の発生回数 N_{eq} を乗じることで、以下のように P_{unc} は求まる

$$P_{\text{unc}} = \frac{N_{\text{eq}} \cdot t_{\text{eq}}}{T_{\text{all}}} \quad (6)$$

これは、「伝搬異常に対する地震の無相関併発確率」とも言い換えられる。そして、 P_{unc} に対する P_{obs} の確率利得、すなわち $P_{\text{obs}}/P_{\text{unc}}$ を評価することで、伝搬異常と地震の関連性を定量的に考察する。つまり、確率利得が1より大きければ大きいほど、伝搬異常と地震の関連性が高いということである。

ここで、解析対象とする地震のパラメータを定める。対象とする地震の規模（マグニチュード）、震央位置（Fig.6 に示すように送信点である東京タワーと受信点である桐生を結ぶ直線を電波伝搬路として、伝搬路から L [km]以内で発生している地震を対象とする）、震源の深さ、関連付け時間長 t_{eq} [days]の値を変更して解析を行った。その結果、地震の規模をマグニチュード5.0以上、震央位置 L を100km以内、震源の深さを75km以内、関連付け時間長 t_{eq} を1日とした場合に最も地震との関連性（ $P_{\text{obs}}/P_{\text{unc}}$ ）が高くなった。その結果をTable 2に示す。

実際に伝搬異常に地震が伴った確率 P_{obs} が9.7%（3/31）であるのに対し、伝搬異常に対する地震の無相関併発確率 P_{unc} が2.9%（17/585）となるため、実際の併発回数 P_{obs} は P_{unc} の約3.3倍となり、伝搬異常と地震との間に関連性があると言える。よって、以降の検討では地震のパラメータをマグニチュード5.0以上、震央位置 L を100km以内、震源の深さを75km以内、関連付け時間長 t_{eq} を1日に限定して地震との関連性を考察する。

Table 2. Relation between earthquakes and anomalous propagation.

Number of anomalous propagation, N_{anom}	31
Number of earthquakes, N_{eq}	17
Number of earthquakes with anomalous propagation, n_{obs}	3
Observed probability of the coincidence, P_{obs}	9.7%
Estimated probability of the uncorrelated coincidence, P_{unc}	2.9%
Probability gain, $P_{\text{obs}}/P_{\text{unc}}$	3.3

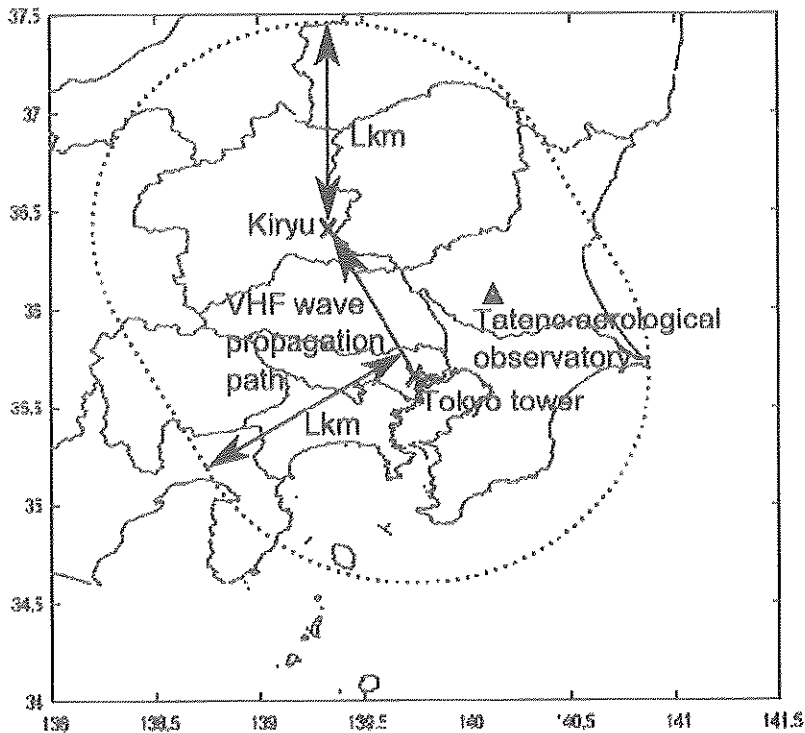


Fig. 6 Region of the earthquakes' epicenters under consideration and VHF wave propagation path.

次に、伝搬異常とラジオダクトのデータに地震発生を加味した場合の考察を行う。Table 1 は地震の有無とは関係なくラジオダクトの発生の有無と伝搬異常の有無についての関係を示したもののだが、それらのうち地震と併発していたもののみを Table 3 に改めて示す。なお、ラジオダクトと地震が併発したと判断する基準は、伝搬異常と同様に、ラジオダクト発生から t_{eq} 以内に地震が発生したかどうかである。Table 3 より、地震と併発して観測された伝搬異常は S 型ダクトが発生した時のみ観測され、接地型ダクトが発生した場合、及びラジオダクトが発生していない場合には地震を伴う伝搬異常は観測されていない。一方で、伝搬異常が観測されていない場合は、S 型ダクトが発生する確率が約 33% (5/15)、接地型ダクトが発生する確率が約 26% (4/15)、ラジオダクトが発生しない確率が 40% (6/15) となっており、伝搬異常観測時と比べて、発生するラジオダクトの種類に大きな差はない。これらの結果から、地震と伝搬異常が併発している場合に限っては、発生しているラジオダクトは 3 例とも全て S 型ダクトであった。

ここで、S 型ダクトと伝搬異常が併発している場合、実際にどのくらい地震との関連性が高くなるか考察を行う。Table 4 に、S 型ダクト発生時の伝搬異常と地震との関連性を示す。Table 2 と比べると、伝搬異常に実際に地震が伴った確率 P_{obs} が 17.6% (3/17) と高くなっている。一方、伝搬異常に対する地震の無相関併発確率 P_{unc} は変わらず 2.9% (17/585) であるから、実際の併発回数 P_{obs} は P_{unc} の約 6.1 倍となり、Table 2 の結果の約 2 倍である。つまり、伝搬異常と S 型ダクトが併発した場合に地震が発生する確率が高くなると考えられる。

また、Fig.1 の観測システムを用いて東京タワーからの放送波の他、埼玉、千葉、茨城などの多面からの FM 放送波も受信している。Fig.7 は送信局の場所がそれぞれ異なる、東京タワー (80.0MHz)、

千葉県三山送信所 (78.0MHz)、茨城県燕山送信所 (83.2MHz) の 2012 年 5 月 16 日の 18 時から 18 日の 18 時までの観測データを示している。どの放送波も伝搬異常発生時刻にあまり時間差はなく、数時間の差で伝搬異常が観測されていることがわかる。また、館野において 16 日の 21 時に接地型ダクト、17 日の 9 時に S 型ダクトが観測されており、第 3 章で定義したダクトと伝搬異常の併発条件を満たしている。その後、18 日の 17 時 18 分に茨城県南部でマグニチュード 4.8 の地震が発生している。これらることより、地震の前兆現象として低層大気の大規模（伝搬路上と館野周辺）な屈折率異常が発生し、伝搬異常が生じていたと考えられる。つまり、複数の放送波で伝搬異常が観測された場合は低層大気の大規模な屈折率異常が発生しており、特定の放送波のみで伝搬異常が観測された場合には、その放送波の伝搬路付近でのみ小規模な屈折率異常が発生していると考えられる。

Table 3. Numbers of occurrence and non-occurrence of anomalous propagation and ducts associated with earthquakes.

	Anomalous propagation	
	Occurrence	Nothing
With S-type ducts	3	5
With grounded ducts	0	4
Without ducts	0	6

Table 4. Relation between earthquakes and anomalous propagation associated with the occurrence of S-type ducts.(Data in Table 2 are indicated in parentheses.)

Number of anomalous propagation, N_{anom}	17(31)
Number of earthquakes, N_{eq}	17(17)
Number of earthquakes with anomalous propagation, n_{obs}	3(3)
Observed probability of the coincidence, P_{obs}	17.6% (9.7%)
Estimated probability of the uncorrelated coincidence, P_{unc}	2.9% (2.9%)
Probability gain, $P_{\text{obs}}/P_{\text{unc}}$	6.1(3.3)

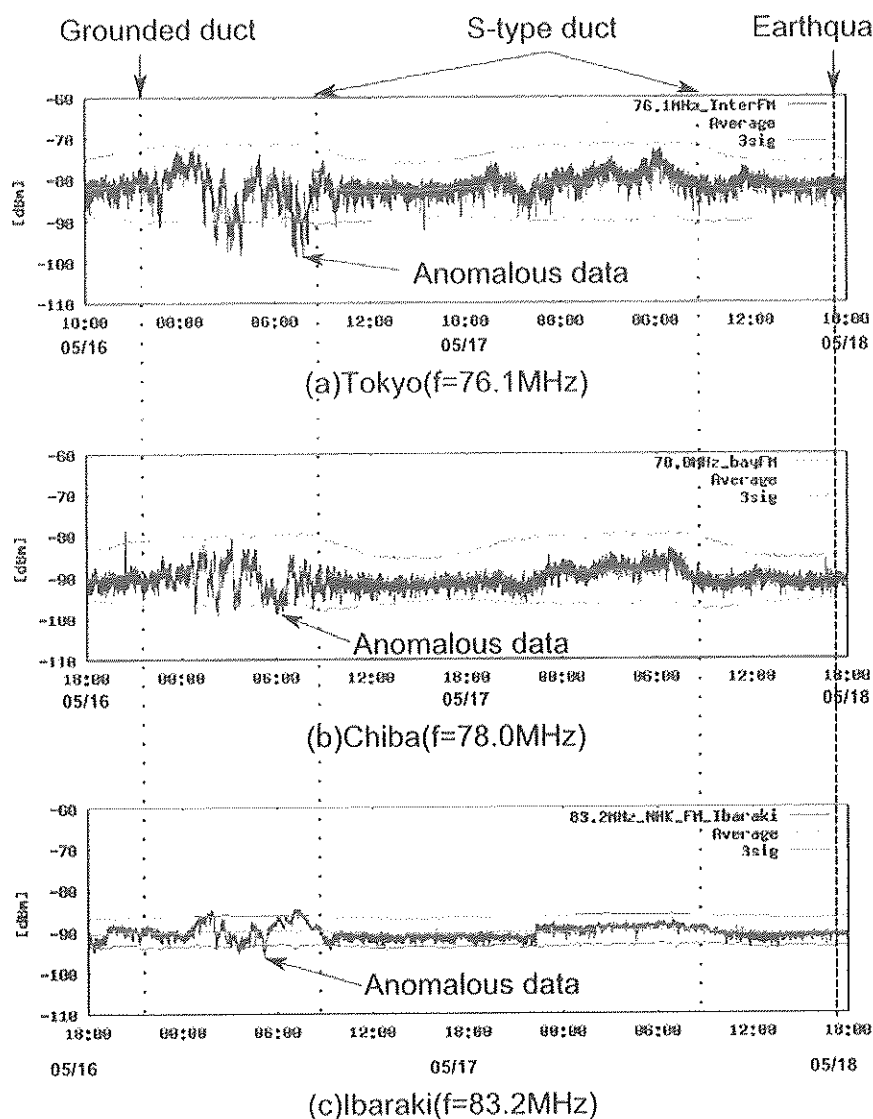


Fig. 7 Anomalous propagation data on VHF band.

5. 気象条件が伝搬異常に与える影響

地震が大気屈折率に影響を与えることで見通し内の伝搬異常が引き起こされるものと考えられるが、地震発生前であっても地表近くの大気屈折率に影響が現れず、伝搬異常が観測されない場合もある。その原因として、地表面近くで強い風が吹いていた場合に、屈折率異常を生じた低層大気が攪拌されてしまうことで、伝搬異常が観測されなくなることが考えられる。そこで、見通し内 VHF 帯電波伝搬路に近い埼玉県熊谷市の風速 v_{wind} と、伝搬異常発生との関連性を調べた。観測期間中、伝搬異常の観測回数 N_{anom} は 31 回（伝搬異常観測日数も 31 日）あったが、そのうち 1 日の平均風速（0 時から 24 時まで）が 2.0m/s を超えた日は 15 日、 3.0m/s 、 4.0m/s を超えた日は共に 1 日であった。つまり、1 日の平均風速が 3.0m/s 以上の場合には、伝搬異常が観測しにくいと考えられる。従って、風が強い日

($v_{\text{wind}} \geq 3.0$ m/s) を観測対象から除外すると、全観測時間長は、 $T_{\text{all}} = 425$ days となった。そこで、以降の検討では、前章で地震との関連性が最も高くなることを示した S 型ダクトと併発して観測された伝搬異常を用いて、かつ、風の強い日の伝搬異常、地震、観測日数を削除して考察を行う。

Table 5 は風の強い日の伝搬異常、地震、観測日数を削除した場合の地震との関連性を示したものである。Table 4 と比べて伝搬異常発生回数 N_{anom} と地震と併発した伝搬異常回数 n_{obs} は変わらないが、地震の発生回数 N_{eq} は少なくなっているため、伝搬異常を伴わない地震が除外されていることがわかる。

N_{eq} が少なくなった結果、 t_{eq} 以内に地震が無相関に発生する確率 P_{unc} が約 1.9% (8/425) と小さくなっているため、実際の併発回数 P_{obs} は P_{unc} の約 9.3 倍となり、Table 2 の結果の約 3 倍、Table 4 の結果の約 1.5 倍である。つまり、気象条件によって電磁気学的現象が妨げられることがあるため、地震と電磁気学的現象の本来の関連性は、実際に観測される結果よりも高いものであると結論付けられる。

Table 5. Relation between earthquakes and anomalous propagation excluding windy days.

(Data in Table 4 are indicated in parentheses.)

Number of anomalous propagation, N_{anom}	17(17)
Number of earthquakes, N_{eq}	8(17)
Number of earthquakes with anomalous propagation, n_{obs}	3(3)
Observed probability of the coincidence, P_{obs}	17.6% (17.6%)
Estimated probability of the uncorrelated coincidence, P_{unc}	1.8% (2.9%)
Probability gain, $P_{\text{obs}}/P_{\text{unc}}$	9.3(6.1)

5. むすび

本論文では、見通し内 VHF 帯放送波の伝搬異常に着目し、東京タワーを送信点とする FM 放送波を観測対象として、群馬大学桐生キャンパスにおける受信電界強度を約 2 年に渡って連続観測した。そして、受信データを統計処理することで伝搬異常を判別し、伝搬異常と気象庁の館野高層大気観測所のデータを用いて得られたラジオダクトとの関連性について考察し、伝搬異常を引き起こすラジオダクトは S 型ダクトである可能性が高い点に注目した。そして、S 型ダクトと併発した伝搬異常と地震の関連性について解析を行った結果、単に伝搬異常が発生した場合の地震との関連性よりも、S 型ダクトと併発した伝搬異常の方が、地震との関連性が高くなることが判明した。また、低層大気屈折率異常を消失させる要因として、気象条件に着目し、風が強い日の伝搬異常、地震、観測日数を除去することにより、地震と電磁気学現象の本来の関連性は、実際に観測されるものよりも高いものであることが判明した。

また、本観測方法は、簡易な観測装置で構成されるため、面的な多点同時観測網を構築しやすい方法である。

今後の課題は、レイトレース法などを用いた電波伝搬シミュレーションによって大気の屈折率異常が見通し内 VHF 帯伝搬に及ぼす影響を検証することや、地震の前兆現象とは関係のない伝搬異常発生要因（例えば雷雨など）を取り除くことにより地震との関連性をより明確にすること、などである。

謝辞

Table 1 中の埼玉県熊谷の気象データは、国土交通省気象庁の熊谷地方気象台の観測結果を利用した。また、大気の修正屈折指数を求める際、気象庁が公開している館野観測点における高層気象データを利用した。

REFERENCES

- Fujiwara H., M. Kamogara, M. Ikeda, J.Y. Liu, H. Sakata, Y.I. Chen, H. Ofuruton, S. Muramatsu, Y.J. Chuo, and Y.H. Ohtsuki, "Atmospheric anomalies observed during earthquake occurrences," *Geophys. Res. Lett.*, vol.31, L17110, 2004.
- Fukumoto Y., M. Hayakawa, and H. Yasuda, "Investigation of over-horizon VHF radio signals associated with earthquakes," *Natural Hazards Earth System Sci.*, vol.1, no.3, pp.107–112, 2001.
- Hall, M. P. M., *Propagation of Radio Waves*, Chapter 6, The Institution of Electrical Engineers, London, 1996.
- Hayakawa M., O.A. Molchanov, T. Ondoh, and E. Kawai, "The precursory signature effect of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signals," *J. Comm. Res. Lab.*, Tokyo, vol.43, no.2, pp.169–180, 1996.
- 早川正士, "地震電磁気現象の計測技術と研究動向," *信学論(B)*, vol.J89-B, no.7, pp.1036–1045, 2006.
- Kushida Y., and R. kushida, "Possibility of earthquake forecast by radio observations in the VHF band," *J. Atmos. Electr.*, vol.22, pp.239–255, 2002.
- 串田嘉男, "地震予報に挑む," PHP 新書, 2000 年出版.
- Molchanov O. A., and M. Hayakawa, "Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes," *J. Geophys. Res.*, vol.103, no.A8, pp.17489–17504, 1998.
- Motojima K., "Precursors of earthquakes in the line-of-sight propagation on VHF band.," *J. Atmos. Electr.*, vol.29, no.2, pp.95–104, 2009.
- 本島邦行, 吉澤将一, "地震に先行して生じる VHF 帯放送波伝搬異常の統計的検討," *信学論(B)*, vol.J92-B, no.2, pp.497–501, 2009.
- 本島邦行, "見通し内 VHF 帯伝搬異常と地震発生との統計的関連性," *J. Atmos. Electr.*, vol.30, no.2, pp.37–49, 2011.
- 西正博, 新原英満, 新浩一, 吉田彰顕, "見通し外 FM 放送波 77.1MHz の 3 年間 3 区間における観測結果," *大気電気学会論文集*, vol.31, no.1, pp.11–22, 2011.
- 進士昌明, "無線通信の電波伝搬," コロナ社, pp.78–79, 1992 年出版.
- Yonaiguchi N., Y. Ida, and M. Hayakawa, "On the statistical correlation of over-horizon VHF signals with meteorological radio ducting and seismicity," *J. Atmos. Solar-terr. Phys.*, vol.69, pp.661–674, 2007. 米内口直之, 増田茂, 伊田裕一, 早川正士, "宮城県沖地震に関連した VHF 帯電磁雑音のフラクタル解析," *信学技報*, AP2007-116, pp.7–11, Dec. 2007.
- 吉田彰顕, 新浩一, 西正博, "見通し外 FM 放送波の伝搬特性と高層気象大気屈折率の関連," *J. Atmos. Electr.*, vol.30, no.2, pp.83–94, 2010.

(Received December 20, 2012; revised June 28;
accepted July 10)